

## 利用采样球体提取真实感纹理<sup>\*</sup>

郑作勇<sup>+</sup>, 马利庄, 曾 洲

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

### Extracting Realistic Textures from Reference Spheres

ZHENG Zuo-Yong<sup>+</sup>, MA Li-Zhuang, ZENG Zhou

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

+ Corresponding author: E-mail: oliver.zheng@sjtu.edu.cn, http://www.sjtu.edu.cn

**Zheng ZY, Ma LZ, Zeng Z. Extracting realistic textures from reference spheres. Journal of Software, 2008, 19(11):3083-3090. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/3083.htm**

**Abstract:** A method for extracting realistic textures from real-world reference spheres is proposed in this paper. The BRDF (bidirectional reflectance distribution function) parameters of fundamental materials, as well as a material weight map for the sphere are obtained through a non-linear optimization process. The material weight map can be used as a conventional texture for relighting. With the BRDF models recovered, the rendered 3D objects can exhibit real and complex appearances with varying light direction/intensity, view point and surface orientations.

**Key words:** texture mapping; radiance; BRDF (bidirectional reflectance distribution function); material weight map; relighting

**摘 要:** 提出了一种从真实物体中提取纹理的方法. 利用具有复杂纹理的参考球体作为被采样物体, 计算其组成材质的 BRDF (bidirectional reflectance distribution function) 模型参数以及各点由不同材质构成的比例, 形成一幅材质权重图. 该图作为纹理映射到 3D 物体上后, 配合 BRDF 模型参数进行渲染, 形成一种适用于重光照 (relighting) 的纹理. 被渲染物体可根据自身方位以及光源亮度/方位呈现出自然的光影变化, 达到较为逼真的外观效果.

**关键词:** 纹理映射; 辐射度; 双向反射分布函数; 材质权重图; 重光照

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

真实感绘制是近年来计算机图形学领域里快速发展的一个研究方向, 对真实材质的表达是其中的一个重要方面. 物体材质对光线的反射和折射性质决定了它的外观. 其中, 描述反射性质经常使用的是双向反射分布函数 (bidirectional reflectance distribution function, 简称 BRDF) 定义为在物体表面处辐射度 (radiance) 和辐照度 (irradiance) 的比值, 它反映了入射光的能量在经过物体表面反射作用后在空间中的分布情况. 而人类视觉系统对物体颜色和形状的感知正是基于物体辐射度对视网膜的作用. 双向反射分布函数再加上光源亮度/位置、视角、物体的几何形状等外部因素, 共同构成一个完整的反射模型, 其中, 双向反射分布函数是反射模型的核心.

为了描述现实世界物体所具有的复杂外观, Hertzmann<sup>[1]</sup>提出了一个通用的反射模型:

<sup>\*</sup> Supported by the National Basic Research Program of China under Grant No.2006CB303105 (国家重点基础研究发展计划(973))

Received 2007-04-05; Accepted 2007-06-30

$$I_{p,c} = \sum_m \gamma_{p,m} f_c(n_p, L, v, \alpha_m) \quad (1)$$

其中,下标  $p$  表示像素索引, $c$  表示颜色分量(RGB), $m$  表示材质索引, $I_{p,c}$  表示像素  $p$  的亮度, $\gamma_{p,m}$  表示像素  $p$  (实际上是像素  $p$  对应的物体点,以下表达均不作区分)由材质  $m$  构成的比例(称为材质权重(material weight));函数  $f_c$  是材质  $m$  的反射模型,描述了组成物体点  $p$  的材质  $m$  的反射性质,其中, $n_p$  表示  $p$  点的法向, $L$  表示光源位置及亮度, $v$  表示视点位置, $\alpha_m$  表示材质  $m$  的 BRDF 模型参数(参数视选择的 BRDF 模型而不同),可以看到  $f_c$  中包含了 BRDF 模型表达式。

在这个模型中,材质权重  $\gamma_{p,m}$  意味着每个物体点  $p$  均由若干材质组成,它的像素亮度实际上是各个单一材质形成亮度的加权平均.Goldman,Curlless 等人<sup>[2]</sup>提出了一种提取物体 BRDF 参数以及材质权重图(material weight map)的方法.我们意识到,这种材质权重图与物体的真实纹理有着自然的联系,可以用常规的纹理映射方式将材质权重图映射到其他 3D 模型上.因此,本文在此基础上提出了一种提取自然纹理的方法,使用带有纹理的球体作为采样对象,以辐射度值代替公式(1)中的亮度  $I_{p,c}$ ,并采用非线性优化的方法反复迭代优化,最终获得了 BRDF 模型参数和材质权重图;在将材质权重图作为纹理映射到其他物体表面上之后,使用 BRDF 模型进行渲染,可以得到与采样球体材质大致相同的感官效果。

## 1 相关工作

在计算机图形学领域,Lambert 漫反射模型和 Phong 镜面反射模型<sup>[3]</sup>由于其计算简单而得到了广泛的应用.随着真实感图形学的发展,越来越多的 BRDF 模型被开发出来,用于模拟真实材质的外观效果,其中应用较多的有 Torrance-Sparrow<sup>[4]</sup>,Cook-Torrance<sup>[5]</sup>,Ward<sup>[6]</sup>,Lafortune<sup>[7]</sup>模型等.使用这些模型仅仅能够描述单一的材质,而现实世界中的物体多半具有空间各异(spatially-varying)的复杂外观.研究表明<sup>[8,9]</sup>,现实物体的反射性质可由若干基本材质(fundamental material)的反射性质以线性组合的形式来表达,这为描述实际物体的外观指出了一个新的发展方向。

Lensch,Kautz 等人<sup>[8]</sup>开发出了一种基于图像的恢复物体材质属性的方法.在物体几何形状已知的情况下,从假设物体由一种材质组成开始,通过优化不断将一种材质分裂为多种材质,使用类似  $K$ -means 的聚类方法,将物体上各点聚类到不同的材质,对属于同一类材质的各点再次进行优化并分裂,构成了一个分裂-聚类-优化的循环过程,直到获得指定数目的材质属性.Goldman,Curlless 等人<sup>[2]</sup>更进一步地假设物体形状为未知,物体由指定数目的材质组成,并且每点由不同比例的材质混合而成.在建立了亮度目标函数之后,借助于在虚拟参考球体(virtual reference object)上的蛮力搜索和非线性优化过程,依次优化获得物体点的法向、不同材质的 BRDF 模型参数以及由这些材质组成的材质权重图.Matusik,Pfister 等人<sup>[10]</sup>对超过 100 种材质的球体采样后,将每个球体海量的采样数据构成一个高维向量,使用主成分分析(primary component analysis,简称 PCA)方法进行降维,将其他任何一种可能材质的 BRDF 表达为降维后的各向量的线性组合,同时,可以利用这种方法生成一些新的物理上合理的 BRDF 模型.上述方法无论是采用解析模型还是基于数据驱动的模式,其基本思想都是使用有限的材质来表达现实世界物体的自然而复杂的外观。

另一方面,在图形学领域,纹理映射是最常见的一种表达材质外观的绘制技术,由于其简单、快速,随着图形硬件的发展得到了广泛的应用.但是,在将图像纹理映射到物体表面时,如果不作额外处理,则会使物体呈现扁平的形状;同时,如果纹理图像中包含了过于明显的光照信息(例如镜面反射),也会使映射后的物体看上去不够真实.常用的解决方法是使用一个预先定义好的 BRDF 模型计算物体的反射信息,然后与纹理图像融合,而 BRDF 模型参数的选择需要事先调整以达到较好的效果.我们认识到,如果将物体复杂的外观使用有限的材质来表达,那么,这些材质的 BRDF 模型参数及其组成物体的材质权重图实际上已经具备了真实感纹理的全部要素:材质权重图反映了物体各点颜色上的差异,而 BRDF 模型表达了物体的质感,同时,由于 BRDF 模型中包含有法向、光源位置和视角的几何参数,可以很容易地实现物体的动态光照效果.正是基于上述思想,我们以 Goldman,Curlless 等人<sup>[2]</sup>提出的算法为基础设计了一个拍照系统,同时对算法作出了改以适应物体上各点颜色明显差异的情况,使其更具适用性。

## 2 原理

我们将具有自然纹理的球体作为拍摄对象,在固定的相机位置和每一个不同的光源位置下,拍摄一组不同曝光度的照片合成高动态范围图像(high dynamic range image,简称 HDRI)作为系统的输入.HDRI 是一种特殊的图像格式,与通常的图像存储整数 RGB 数值不同,它存储了 RGB 的 3 个分量上浮点数形式的辐射度值.为了求解球体的材质权重图 $\gamma_{p,m}$ 和 BRDF 模型参数集 $\alpha_m$ ,建立下列目标函数用于参数优化:

$$Q(\alpha, \gamma) = \sum_{l,p,c} \left( I_{l,p,c} - \sum_m \gamma_{p,m} f_c(n_p, L_l, v, \alpha_m) \right)^2 \tag{2}$$

式(2)中各个参数的具体含义见文章开始部分.另外,下标  $l$  表示光源位置索引, $I_{l,p,c}$  表示物体点  $p$  在不同光源位置  $l$  照射下的像素亮度(在本文中,我们用“辐射度”代替了“亮度”,两个术语在下文中不作区分).目标函数  $Q$  中的  $f_c$  是单一材质  $m$  的反射模型,具体定义为如下形式:

$$f_c = \ell_c \cdot \cos \theta_i \cdot BRDF \tag{3}$$

这里,  $\ell_c$  表示光源亮度(注:公式(2)中的  $L$  除了光源亮度之外,还包含了光源位置信息), $\theta_i$  表示物体点法向和入射光线之间的夹角.在本文中使用的 BRDF 模型是各向同性 Ward 模型<sup>[6]</sup>:

$$BRDF(\theta_i, \theta_r, \sigma) = \frac{\rho_{d,c}}{\pi} + \frac{\rho_{s,c}}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \frac{\exp[-\tan^2 \sigma / \beta^2]}{4\pi\beta^2} \tag{4}$$

其中, $\rho_{d,c}$  和  $\rho_{s,c}$  分别表示漫反射系数和镜面反射系数, $\beta$  表示材质的粗糙度. $\rho_d$  和  $\rho_s$  在颜色分量  $c$  上各有一个值,因此是两个  $3 \times 1$  向量,加上  $\beta$  共 7 个参数,构成了 BRDF 参数集  $\alpha$ .本文中预先假设物体由两种材质组成,因此, BRDF 模型共有 14 个待求解的参数. $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别表示光线入射和反射向量与物体点法向的夹角, $\sigma$  表示由入射向量和反射向量形成的半角向量(halfway vector)对法向的夹角(如图 1 所示),这些几何量实际上体现在公式(2)中  $f_c$  函数的参数  $n_p, L_l$  以及  $v$  中.

在公式(2)所表达的目标函数  $Q$  中,除了材质权重图 $\gamma_{p,m}$ 和 BRDF 模型参数集 $\alpha_m$ 未知以外,其余均是已知量.求解 $\gamma_{p,m}$ 和 $\alpha_m$ 是本文的最终目标,求解的过程就是利用目标函数  $Q$  对这两者进行交替优化迭代的过程,具体算法在第 3.6 节详细加以描述.

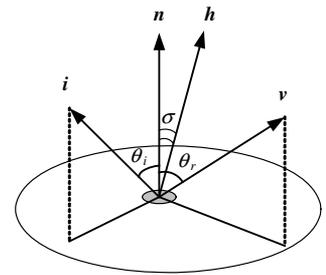


Fig.1 Geometry of BRDF  
图 1 BRDF 的几何模型

## 3 实现步骤

### 3.1 实验设置



Fig.2 Experiment setup  
图 2 实验环境

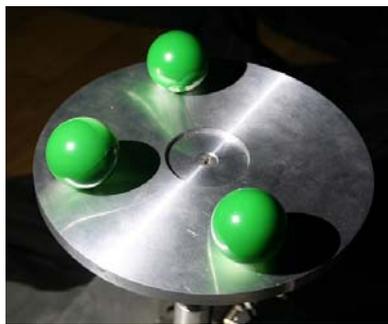
拍照环境是一个用黑色绒布封闭的空间,用来排除外来光线的干扰.相机型号是 Canon EOS 5D,配备 200mm 长焦镜头,在整个拍摄过程中固定在三角架上,位置固定不变,使用随相机附送的软件联机遥控拍摄.光源是 5W 卤素灯泡,被安装在一个由计算机精确控制的绕水平面(沿垂直轴)旋转的金属支架上,实验中采用了 7 个不同的光源位置.在本文中,被采样的物体是已知形状的球体.采用球体的原因是其上各点法向均匀分布,配合不同的光源位置,可以得到充分的采样数据.我们使用了两个具有自然纹理的球体:大理石球和条纹木球.在每一个不同的光源位置上,对球体拍摄一组不同曝光度的照片,从 1/100s 到 15s 共 10 档曝光时间,而光圈始终固定在 5.6.实验环境如图 2 所示.

### 3.2 相机标定/光源标定

我们使用 Bouguet 的标定软件<sup>[11]</sup>对相机的内部和外部参数进行标定;同时,相机的辐射度响应曲线使用 Debevec 和 Malik 的方法<sup>[12]</sup>计算获得,用于将不同曝光时间下的一组照片合成为单张的 HDR 图像。

光源位置借助于 3 个涂有绿色手喷漆的乒乓球上的高光点来确定.将这 3 个球体摆放在拍摄平台上,拍摄正常曝光时间(1s)和极小曝光时间(1/200s)的照片各一张(如图 3 所示).球体的实际半径用游标卡尺测量(单位:mm),而在正常曝光度的照片上,球体图像的中心和半径通过拟合其边缘轮廓为一个圆而获得(单位:像素).在相机参数已知的情况下,可以求得该球体中心的 3D 坐标.在极小曝光度照片上,手工在这 3 个球体上标出各自最亮的一点,计算其对应的实际物体点处的法向,光源位置就是这 3 点的成像光线关于其法向对称的 3 条直线的交点,采用 SVD 方法求解。

光源的亮度采用反射率为 18% 的灰度卡确定,通过 Lambert 模型很容易地计算获得。



(a) Exposure time 1s, used to calculate the sphere center coordinates by fitting a circle silhouette

(a) 曝光时间 1s,用于拟合球体的轮廓从而求取球心坐标



(b) Exposure time 1/200s, used to calculate the light source position via the specular spike points

(b) 极小曝光时间 1/200s,利用球体上的高光点求取光源位置

Fig.3 Photographs for Calibration of the light source position

图 3 用于光源位置标定的照片

### 3.3 采样球体辐射度计算

我们利用相机响应曲线,在不同光源位置下拍摄的一组不同曝光度的照片合成为单张的 HDR 图像.在 HDR 图像中,采样球体上的高光波瓣(specular lobe)和高光尖点(specular spike)能够被很好地分辨出来.在将不属于采样球体所在区域的无效图像点去除后,再将处于背光阴影中的无效点去除.对于剩下的各点,我们利用相机参数和光源位置参数,计算拟合 Ward 模型时需要用到的一些几何参数:光线入射角 $\theta_i$ 、出射角 $\theta_r$ 以及半角向量和法线的夹角 $\sigma$ 。

### 3.4 漫反射系数和材质权重图估计

为了有效地估算采样球体漫反射系数的初值,需要将处于高光状态的像素点先行去除.根据实验中光源位置的安排,我们对每一个物体点排除其 7 个成像点(对应 7 个光源位置)中最亮的两个像素点,剩下的像素点可以认为大致符合 Lambert 模型,可以计算得到 $\rho_d$ 的平均值作为初值。

在计算了所有物体点的漫反射系数后,将其转换至 HSV 空间,抛弃 V 分量,使用 K-means 算法根据 $(\cos(2 \times \pi I \times H), \sin(2 \times \pi I \times H), S)$ 对物体点进行聚类,这样就将物体点大致分为两类,每一类分别对应一种材质.将漫反射系数转换至 HSV 空间有助于排除反射率的影响。

然后,根据划分到每一类材质中的所有点的辐射度数据,估算此类材质的漫反射系数.此时,每一点仅由其所属的材质组成,但其材质权重(即含有该种材质的比例 $\gamma$ )不同,也就是说,属于此类材质的所有点的漫反射系数都是相同的,其外观的不同是由于材质权重不同造成的.在此情况下,Lambert 模型具体展开为

$$I_{l,p,c} = \gamma_p \ell_{l,c} \cos \theta_l \frac{\rho_{d,c}}{\pi} \tag{5}$$

其中,光源亮度 $\ell_{l,c}$ 、材质漫反射系数 $\rho_{d,c}$ 和每点的材质权重 $\gamma_p$ 是未知的,共  $P+3$  个未知数( $P$  表示物体点数);而对于每一个物体点  $p$  在光源位置  $l$  下的成像,都将提供 3 个方程,共  $P \cdot L \cdot 3$ ( $L$  表示光源位置数,在本文中是 7) 个方程.方程的个数远远超过了未知数个数,因此可以使用最小二乘法求解.令  $R_{l,c} = \frac{\ell_{l,c} \cos \theta_l}{\pi}$ , 公式(5)变为

$$I_{l,p,c} = \gamma_p \rho_{d,c} R_{l,c} \tag{6}$$

两边取对数,得到

$$\ln \gamma_p + \ln \rho_{d,c} - \ln(I_{l,p,c}/R_{l,c}) = 0 \tag{7}$$

求解未知数 $\gamma_p$ 和 $\rho_{d,c}$ 的问题转变为使下列二次目标函数取得最小值:

$$\Psi = \sum_{l,p,c} (\ln \gamma_p + \ln \rho_{d,c} - \ln(I_{l,p,c}/R_{l,c}))^2 \tag{8}$$

最终将得到一个稀疏线性方程组来进行求解.注意到公式(8)的解并非唯一的,即如果 $\gamma_p$ 和 $\rho_{d,c}$ 是问题的解,则 $a\gamma_p$ 和 $\rho_{d,c}/a$ 同样是解( $a$ 为任意正数),即使有 $0 < \gamma_p \leq 1$ 和 $0 < \rho_{d,c} \leq 1$ 这样的约束也无法获得唯一的解.因此,我们假设亮度最大的像素点 $p_{\max}$ 的 $\gamma_{p_{\max}}$ 为 1,即亮度最大的点完全由此种材质组成,这样就加入了一个约束,使公式(8)得到唯一的解.这样的假设未必完全符合实际情况,但是可以得到关于漫反射系数和材质权重的一个合理的初值.

### 3.5 镜面反射系数估计

在推导计算出了两类材质的漫反射系数以及每个物体点由其中一种材质组成的权重以后,接下来估算两类材质各自的镜面反射系数.在 Ward 模型中(见公式(4)),镜面反射系数由镜面反射率 $\rho_s$ ( $0 \leq \rho_s \leq 1$ )和物体粗糙度 $\beta$ ( $\beta > 0$ )组成.针对每一类材质及其所包含的点,我们令漫反射系数和材质权重保持不变,使用 Levenberg-Marquardt 非线性优化方法使下列目标函数取得最小值,从而获得 $\rho_s$ 和 $\beta$ 的初始估值:

$$Q(\rho_s, \beta) = \sum_{l,p,c} \left( I_{l,p,c} - \gamma_p \ell_{l,c} \cos \theta_l \left( \frac{\rho_{d,c}}{\pi} + \frac{\rho_{s,c}}{\sqrt{\cos \theta_l \cos \theta_r}} \frac{\exp[-\tan^2 \sigma / \beta^2]}{4\pi\beta^2} \right) \right)^2 \tag{9}$$

### 3.6 整体优化

在获得了两类材质所有的 Ward 模型参数和采样球体的材质权重图的初始估值后,分别对各点的材质权重进行单独的优化,并对 BRDF 模型参数进行整体的优化,以获得更加精确的结果.具体过程为,保持 BRDF 参数固定不变,针对各点  $p$ ,优化下列带有约束的目标函数:

$$\begin{cases} Q(\gamma_{p,m}) = \sum_{l,p,c} \left( I_{l,p,c} - \sum_m \gamma_{p,m} f_c(n_p, L_l, v, \alpha_m) \right)^2 \\ \exists m, \gamma_{p,m} \geq 0, \sum_m \gamma_{p,m} \leq 1 \end{cases} \tag{10}$$

此优化同样使用 Levenberg-Marquardt 方法进行.需要注意的是,每个点的 $\gamma_p$ 在进行优化前的初值为( $\gamma_{p,m1}$ ,  $\gamma_{p,m2}$ ),如果点  $p$  初始划分到材质  $m1$  中,则为( $\gamma_{p,m1}, 0$ );如果划分到  $m2$  中,则是( $0, \gamma_{p,m2}$ ).另外,我们允许  $\sum_m \gamma_{p,m} < 1$ , 这样就拓展了仅使用两种材料即可表达物体上各点存在较大颜色差异的能力.

在对各点的材质权重 $\gamma_p$ 逐一进行优化以后,将其保持固定,再对两类材质的 BRDF 模型参数 $\alpha_m$ 进行整体优化,其过程类似第 3.5 节中的镜面反射系数估计,但不同的是,需要对两类材质 BRDF 共 14 个参数同时进行优化,其初值已经分别在第 3.4 节和第 3.5 节估算出来.

上述材质权重和 BRDF 参数的两个优化步骤交替进行,直到最终结果收敛,终止迭代.

在实验过程中我们发现,各点的辐射度值最大相差到 2 500 倍左右,因此,如果使用公式(2)作为待优化目标函数的基本形式,则会以辐射度的绝对误差作为目标函数的度量.在此情形下,因为高光区域的辐射度值最大,

优化过程将会过度强调该区域内辐射度值的逼近程度,导致在其他非高光区域内各点的辐射度值偏离其实际测量值较大.因此,我们将公式(2)中的目标函数改为相对误差的形式:

$$Q(\alpha, \gamma) = \sum_{l,p,c} \left[ \frac{I_{l,p,c} - \sum_m \gamma_{p,m} f_c(n_p, L_l, v, \alpha_m)}{I_{l,p,c}} \right]^2 \quad (11)$$

这样,根据优化模型计算得到的辐射度理论值从整体上来说则更接近实际测量值.

### 3.7 真实感渲染

从采样球体恢复的材质权重图代表了两种材质在球体表面的分布,因而可被认为是一种自然纹理的表达方式;再加上两种材质各自的 BRDF 参数,具备了渲染真实感 3D 模型的基础.我们将材质权重图直接当作一种特别的纹理图,采用常规的纹理映射方式将其映射到任意一个 3D 模型.在指定了视角、光源位置和亮度等环境信息后,利用 BRDF 模型计算 3D 物体上各顶点在 R/G/B 三个分量上的辐射度,并最终转换成颜色值.此过程完全模拟了一般相机的成像过程,与常规的“BRDF 模型+漫反射颜色”渲染方式相比,材质权重图和 BRDF 参数完全从实际物体中提取,减少了参数调整的过程,因而可被认为是一种更具真实感的基于图像的渲染方法.

## 4 实验结果及其应用

我们在第 3.1 节中描述的实验环境下对一个大理石球和一个条纹木球进行拍照,按照第 3.2 节~第 3.6 节描述的步骤合成 HDR 图像,并优化计算,最终获得了球体有效区域的材质权重图和两个 Ward 模型的全部 14 个参数.结果如图 4 所示.

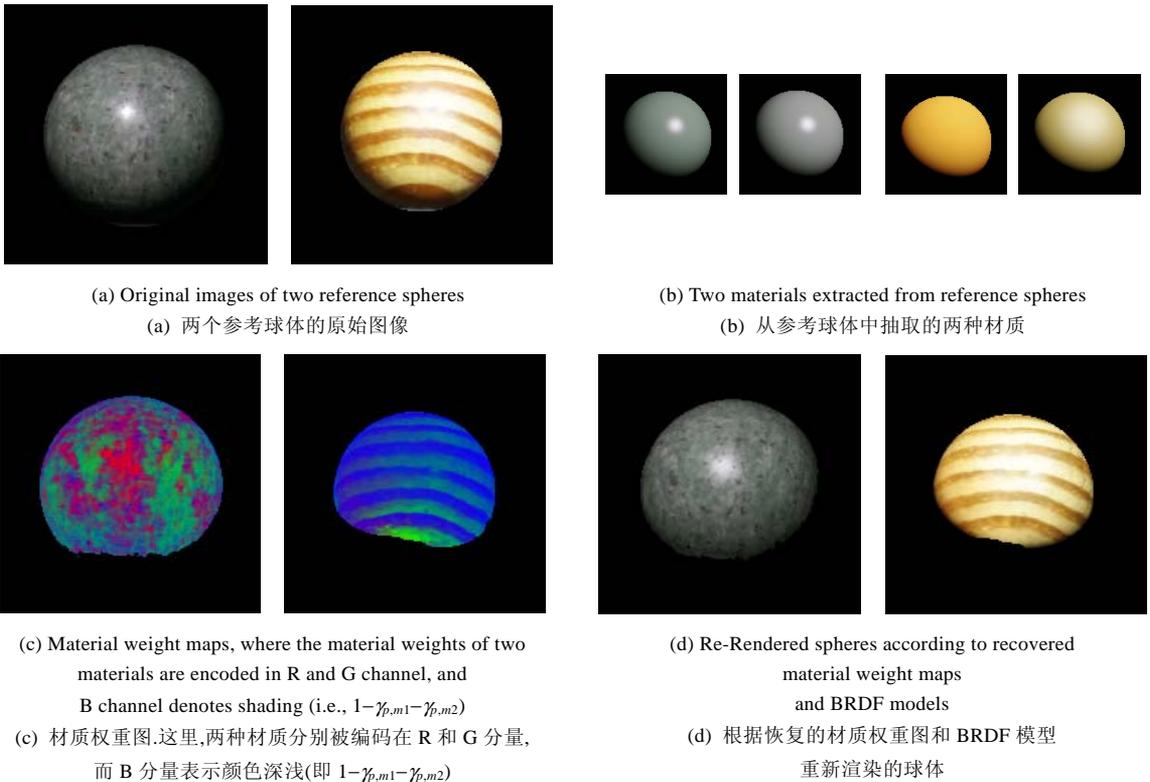


Fig.4 Experimental results

图 4 实验结果

大理石球和条纹木球的有效像素点数分别约为 13 000 和 11 000,每个像素点的有效采样数据数为 3~7 个不等(对应有效的光源位置),总体的有效采样数据数(即参加优化的数据数)分别约为 56 000 和 47 000.我们使用的计算机配备 AMD Athlon 3000+CPU 和 1G DDR 400 内存,对两个采样球体的整个优化过程分别需要大约 45 分钟,在经过大约 10 次迭代后收敛.优化结束时的平均相对误差(见公式(11))分别为 5.89%和 4.34%.图像处理、HDR 合成以及参数优化的整个过程使用 Matlab R2006a 实现.

如第 3.7 节所述,我们将材质权重图当作纹理图,从中选取出一块 64×64 的样图,将其映射到以三角片形式表达的 3D 网格上,利用 Ward 模型计算了网格上各顶点 R/G/B 分量上的辐射度后,再利用已知的 Canon EOS 5D 的相机响应曲线,设定曝光时间是 2s(可以是任意一个有效的曝光时间),将其转换至 RGB 颜色.被渲染物体随着光源位置、视点位置及自身方位的变化,呈现出与被采样物体相同的质感和动态的光影效果.渲染过程用 Visual C++6.0 和 OpenGL 1.2 实现,3D 网格模型来自文献[13].结果如图 5 所示.

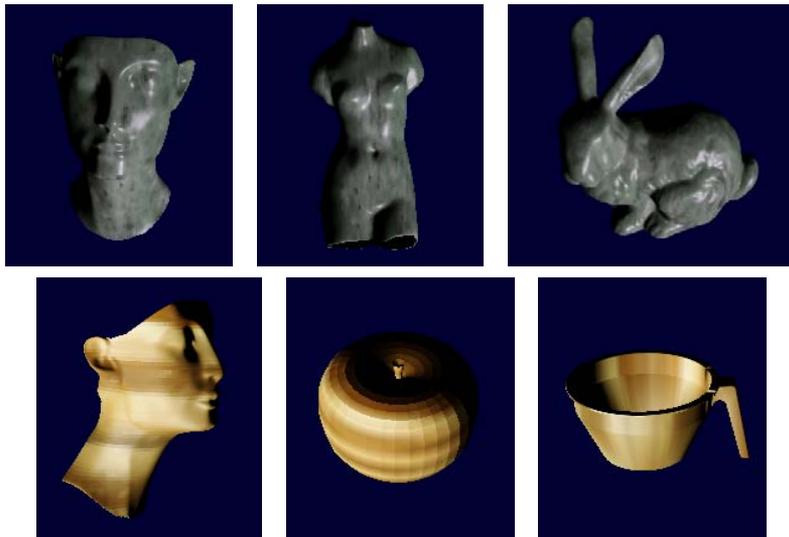


Fig.5 Realistic rendering with the materials of the marble and wooden sphere

图 5 利用大理石球和条纹木球的材质进行真实感渲染

## 5 总结

本文提出了一种提取球体的材质权重图和 BRDF 模型参数的方法,使用简单的纹理映射技术,能够比较有效地绘制三维物体的外观,可以应用于三维游戏和虚拟现实等领域中的场景绘制.在获取材质权重图和 BRDF 模型参数的过程中,对精度影响最大的是 BRDF 模型的选择.正如文献[10]中所指出的,一种特定的 BRDF 模型并不能适合所有的材质,因此,本文中所使用的各向同性 Ward 模型也可以根据需求,替换为其他模型.

另外,本文中采样物体的形状是球体,由于其表面法向分布的均匀性,因而构成一种廉价并且实用的采样方案;圆柱状物体同样可以作为较好的选择.对于平面物体和其他不规则但是已知形状的对象(比如事先使用激光扫描仪扫描重建过),需要旋转物体到不同角度,以增加采样数据在几何关系上的充分性.无疑,后两者具有更好的适用性,但是将涉及到图像配准等繁复的工作.

最后,本文中采用的材质数是 2,如果优化后的平均相对误差较大,则表明仅仅使用两种材质不能表达更为复杂的外观,应考虑增加基础材质数.

致谢 本文得到了欧姆龙(中国)公司的部分资助,同时,肖学中、谭武征和许志梁同志对本文亦有帮助,在此一并表示感谢.

**References:**

- [1] Hertzmann A, Seitz SM. Example-Based photometric stereo: Shape reconstruction with general, varying BRDFs. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005,27(8):1254–1264.
- [2] Goldman DB, Curless B, Hertzmann A, Seitz SM. Shape and spatially-varying BRDFs from photometric stereo. In: Lin S, ed. *Proc. of the 10th IEEE Int'l Conf. on Computer Vision (ICCV 2005)*. Beijing: IEEE Computer Society Press, 2005. 341–348.
- [3] Foley JD, Dam AV, Feiner SK, Hughes JF, Philips RL. *Introduction to Computer Graphics*. Beijing: China Machine Press, 2004. 478–488.
- [4] Torrance KE, Sparrow EM. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 1967,57(9):1105–1114.
- [5] Cook RL, Torrance KE. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. on Graphics*, 1982,1(1):7–24.
- [6] Ward GJ. Measuring and modeling anisotropic reflection. In: Patrovich L, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'94*. New York: ACM Press, 1994. 239–246.
- [7] Lafortune EPF, Foo SC, Torrance KE, Greenberg DP. Non-Linear approximation of reflectance functions. In: Spencer SN, ed. *Proc. of the SIGGRAPH'97*. Los Angeles: Addison Wesley Publishing Co., 1997. 117–126.
- [8] Lensch HPA, Kautz J, Goesele M, Heidrich W, Seidel HP. Image-Based reconstruction of spatial appearance and geometric detail. *ACM Trans. on Graphics*, 2003,22(2):234–257.
- [9] Matusik W, Pfister H, Brand M, McMillan L. Efficient isotropic BRDF measurement. In: Dutre P, ed. *Proc. of the 14th Eurographics Workshop Rendering*. Aire-La-Ville: Eurographics Association, 2003. 241–248.
- [10] Matusik W, Pfister H, Brand M, McMillan L. A data-driven reflectance model. *ACM Trans. on Graphics*, 2003,22(3):759–769.
- [11] [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html)
- [12] Debevec PE, Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In: Owen GS, ed. *Proc. of the 24th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. 369–378.
- [13] <http://www.cs.technion.ac.il/~cs234325/Software-Sources/Models/index.html>



郑作勇(1970—),男,河南荥阳人,博士生,主要研究领域为网格动画,网格细分.



曾洲(1979—),男,博士生,主要研究领域为基于图像的建模与绘制.



马利庄(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为计算机图形学,计算机辅助几何设计.